

УДК 531.374; 539.213

С. Черепов; В. Лепеха

Інститут магнетизму НАН та МОН України

## ІНДУКТИВНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИХРОСТРУМОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ

**Резюме.** Продemonстровано виготовлені індуктивні сенсори високої роздільної здатності для вихрострумових перетворювачів. Сенсори були досліджені для визначення їх роздільної здатності в скануючому дефектоскопі. Отримано двовимірні магнітні образи системи модельних дефектів, на яких визначено реальну роздільну здатність сенсорів. Реальна роздільна здатність сенсорів становить менше 50 мікрон. Типові розміри індуктивних сенсорів складають приблизно 1 мм у діаметрі при довжині близько 5 мм. Наведено фото сенсорів на різних етапах виготовлення, а також фото системи модельних дефектів та їх двовимірний магнітний образ. Також продемонстровано реальне магнітне зображення зварного шва в алюмінії, отримане таким сенсором за допомогою скануючого дефектоскопа. Зроблено висновок про перспективність використання сенсорів такого типу в новітніх розробках вихрострумових дефектоскопів скануючого та матричного типів.

**Ключові слова:** вихрострумова дефектоскопія, сенсор, індуктивний сенсор, вихрострумовий перетворювач, висока просторова роздільна здатність.

S. Cherepov, V. Lepekha

## THE INDUCTIVE SENSORS FOR HIGH RESOLUTION EDDY CURRENT NON-DESTRUCTIVE TESTING

**Summary.** This paper presents the novel inductive sensors for the high-resolution eddy current scanning heads used for non-destructive testing of the welded joints and material non-uniformities. The inductive coils, used for magnetic excitation and detection of the inductive response, were wound with 20  $\mu\text{m}$  copper wire on the ferrite core with diameter down to 300  $\mu\text{m}$ . In this work we present the description of the inductive sensors fabrication procedure, as well as their dimensions and pictures. The fabricated eddy current sensors were fixed on the sensor holder, mounted on the computer controlled industrial 2D scanning system with nominal spatial motion precision of 25  $\mu\text{m}$ . The 2D magnetic images, obtained by recording sensor signal in each point of the scanning range, were used to determine the sensor's ultimate resolution in detection of material non-uniformities (defects). The test samples, specially designed for this purpose, have artificially created test defects with various dimensions and depth. The test samples were designed to model cracks and corrosion pinholes in magnetic (steel) and non-magnetic (aluminum alloy) materials. The two-dimensional magnetic image of the test samples reveals the actual spatial resolution of the sensors, found to be less than 50 micrometers. Moreover, the sensitivity of the developed inductive sensor is high enough not only to image point like inclusions but also to image the thermal stress zone in the aluminum welded joint, as shown in the paper. The small size of the sensors, typically ~1 mm in diameter and ~5 mm in length, allows dense packaging of multiple sensors into the compact multisensory scanning head of the matrix type. The size and sensitivity of the presented eddy current sensors make them a promising candidate for application in the latest non-destructive scanning diagnostics systems."

**Key words:** eddy current diagnostics, inductive sensor, eddy current transducer, high spatial resolution.

**Вступ.** У сучасній магнітній дефектоскопії індуктивні сенсори займають одне з чільних місць серед чутливих вихрострумових перетворювачів. Їх широке застосування пов'язане з тим, що вони працюють у значному широкому частотному та динамічному діапазоні, великому динамічному діапазоні, а також значним широким спектром матеріалів, які можуть бути досліджені цими чутливими елементами [1].

Для сучасного автоматизованого виробництва надзвичайно актуальними є такі властивості індуктивних сенсорів, як можливість отримання інформації без прямого механічного контакту з досліджуваним зразком, а також добра захищеність від вологи та забруднення [2].

В останній час значного розвитку починає набувати вихрострумова дефектоскопія високої роздільної здатності як однозондова скануюча, так і багатозондова матрична [3 – 5].

Залежно від поставлених промисловістю завдань роздільна здатність приладів такого типу може сягати кількох десятків мікрон і навіть менше. В даній роботі продемонстровано результати розробок індуктивних сенсорів для вихрострумової дефектоскопії високої роздільної здатності, що були виконані в Інституті магнетизму НАН та МОН України.

В якості основи сенсорів було використано осердя з феритів марок 50ВЧ, 100ВЧ, 150ВЧ, 400НН, 600НН, 1000НН та 2000НН, які працювали у відповідному їхнім параметрам діапазоні частот. Очевидно, що для збільшення роздільної здатності такого типу сенсорів необхідно зменшувати область активної взаємодії сенсора з досліджуваною поверхнею, що технічно може бути досягнуто тільки зменшенням діаметра осердя. Отримати феритові стрижні малого діаметра є досить складною технологічною задачею, так як ферит є дуже крихким матеріалом.

На практиці використовується кілька методів отримання тонких феритових стрижнів. Першим є метод екструзії, коли заготовка стрижня витискується через тонкий отвір, висушується, а потім спікається. Виготовити таким методом феритові осердя доброї якості (однорідність та монолітність заготовки) діаметром менше 1 мм не вдається. Тому нашу основну увагу було направлено на розроблення методів шліфування заготовок з пресованих феритів, які різались та обшліфовувались за класичними методами [6]. В доповнення до класичних методів було розроблено метод фінішної доводки стрижнів до необхідної якості поверхні. Досягнуті в цьому напрямку результати шліфування феритових стрижнів сенсорів можна бачити на рис. 1 – рис. 3.

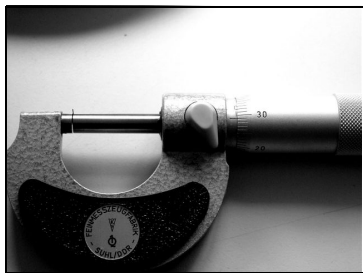


Рисунок 1  
Figure 1

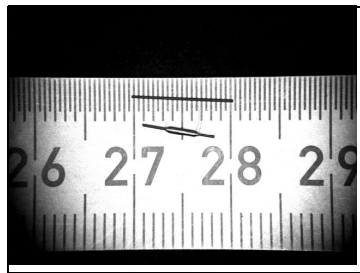


Рисунок 2  
Figure 2

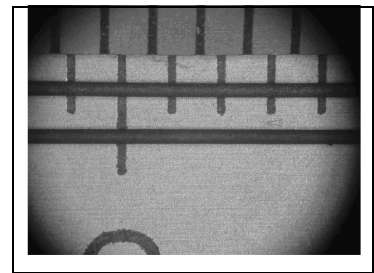


Рисунок 3  
Figure 3

**Рисунок 1.** Шліфований феритовий стрижень для індуктивних сенсорів діаметром 300 мкм

**Figure 1.** A polished ferrite rod with a diameter of 300 μm used as a core for inductive sensors

**Рисунок 2.** Феритовий стрижень і вторинна котушка сенсора, намотана дротом 20 мкм

**Figure 2.** The ferrite core and secondary coil of sensor, wound with the 20 μm wire

**Рисунок 3.** Зовнішній вигляд поверхні стрижнів після шліфівки та доводки

**Figure 3.** The exterior surface of the ferrite rods after polishing

Виготовлені таким чином феритові стрижні використовувались як осердя в індуктивних сенсорах, які мали обмотки збудження, намотані дротом товщиною 100 – 150 мкм, та вторинні сигнальні обмотки, що були виготовлені з дроту товщиною 20 мкм. Діаметр такого сенсора становить близько 1 мм при довжині близько 5 мм. Зовнішній вигляд сенсора з первинною та вторинною котушками зображено на рис. 4.

Такі сенсори можуть бути використані як основа для матричних сенсорних блоків вихрострумових перетворювачів дефектоскопів високої роздільної здатності, так і в якості самостійних чутливих елементів у скануючих дефектоскопах. На рис. 5 та рис. 6

зображено одиночні чутливі елементи для скануючих дефектоскопів. На рис. 5 зображено сенсор для сканування внутрішньої поверхні деталей з малим радіусом кривизни,  $R=0.5$  мм, на рис. 6 зображено сенсори для сканування плоских та вигнутих поверхонь.



Рисунок 4  
Figure 4

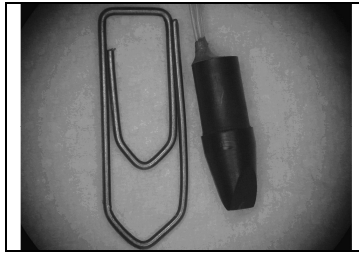


Рисунок 5  
Figure 5

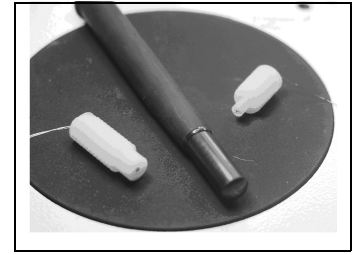


Рисунок 6  
Figure 6

**Рисунок 4.** Зовнішній вигляд сенсора у зборі перед монтажем його в тримач, крок лінійки 1 мм

**Figure 4.** The exterior view of the sensor assembly before installation into the holder, shown on the 1 mm grid

**Рисунок 5.** Сенсор для сканування внутрішніх поверхонь з малим радіусом кривизни

**Figure 5.** The sensor for the scanning of the internal surfaces made with a small curvature radius

**Рисунок 6.** Сенсори високої роздільної здатності різноманітного призначення

**Figure 6.** Multipurpose high definition sensors

Кажучи про сенсори для вихрострумової дефектоскопії високої роздільної здатності, які виготовляються в Інституті магнетизму НАН та МОН України, неможливо обійти увагою досягнуті за допомогою таких сенсорів результати стосовно роздільної здатності скануючих дефектоскопів.

У скануючому дефектоскопі інформація про досліджуваний об'єкт подається у вигляді двовимірного зображення, в якому по осях X та Y відкладаються координати сенсора над досліджуваним об'єктом, а сигнал з сенсора у відповідній точці об'єкта подається у вигляді яскравості або кольору.

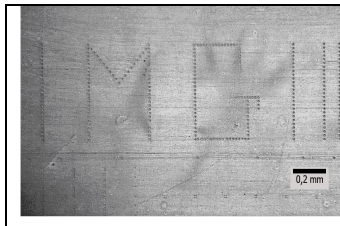


Рисунок 7  
Figure 7

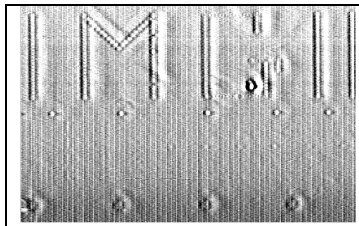


Рисунок 8  
Figure 8

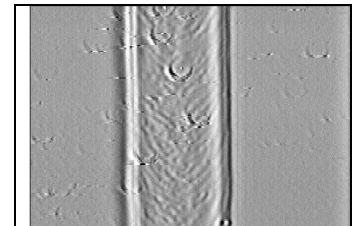


Рисунок 9  
Figure 9

**Рисунок 7.** Мікрофотографія модельних дефектів у вигляді відбитків від уколів мікротвердоміра, що виконані з кроком 25 мкм

**Figure 7.** The picture of the model defects, made by microhardness tester injections. The injections are made in 25  $\mu\text{m}$  increment

**Рисунок 8.** Двовимірний магнітний образ від модельних дефектів - відбитків мікротвердоміра, зображених на рис. 7

**Figure 8.** The two-dimensional magnetic image of model material defects, i.e. microhardness device prints, depicted in Figure 7

**Рисунок 9.** Магнітний образ шліфованого зварного шва в алюмінію

**Figure 9.** Magnetic image of polished welding joints in aluminum

В якості модельного об'єкта використали систему відбитків мікротвердоміра на алюмінієвій пластині. Мікрофотографія модельних дефектів представлена на рис. 7, крок між відбитками становить 25 мікрон. Отриманий таким чином рельєф сканувався за допомогою двовимірної системи сканування, що була виконана на основі контролера та систем переміщення фірми «Isel», ФРН.

Двовимірний магнітний образ від системи модельних дефектів-відбитків мікротвердоміра, що зображена на рис. 7, можна побачити на рис. 8. На цьому зображенні бачимо пропуски в системі відбитків, відстань між якими дорівнює 50 мкм (правий бік букви М) та окремі відбитки в нахилених під кутом до горизонталі частинах букви М, відстань між якими дорівнює близько 35 мкм. Зображення отримано за допомогою растрового формування одним сенсором.

На рис. 9 можна побачити магнітний образ шліфованого зварного шва в алюмінію. Образ отримано за допомогою растрового сканування одним сенсором з діаметром активної зони близько 300 мкм. Чітко бачимо структуру металу у шві, поля термічних напруг та точкові дефекти у вигляді крапок з кільцями.

**Висновки.** Продемонстровано властивості та можливості виготовлених в ІМаг НАН та МОН України малогабаритних індуктивних сенсорів для вихрострумових перетворювачів. Дані сенсори можуть знайти використання в багатьох нових приладах вихрострумової дефектоскопії високої роздільної здатності.

**Conclusions.** Properties and capabilities of the compact inductive sensors for eddy current scanning heads, used for non-destructive metal diagnostics have been presented. The compact dimensions and the sensitivity of the built sensors make them feasible for applications in novel high resolution eddy current based scanning diagnostics tools.

#### Список використаної літератури

1. Розділ "Eddy Current Inspection" in ASM Handbook, Volume 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control., Fifth printing, December 1997.
2. Неразрушающий контроль: справочник в 7 томах. – Том 2. – Москва: Машиностроение, 2003, С. 373 – 380.
3. Lafontaine, G. Samson, R. Eddy Current Array Probes for Faster, Better and Cheaper Inspections. NDT.net, October, 2000. – Vol. 5. – No. 10.
4. Electromagnetic imaging using probe arrays. Gerhard Mook, Fritz Michel, Jouri Simonin, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25 – 28 Oct, 2008, Shanghai, China.
5. Mook, G., Simonin J., Michel F. Wirbelstrom-Sensorarrays zur bildgebenden Randschichtprüfung Sommerkurs Werkstoffe und Fügen am Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 23. und 24. September 2011, P. 113 – 124.
6. Бонд, В.Л. Технология кристал лов [Текст] / В.Л. Бонд. – Москва, Недра, 1980. – С. 208. – Рис. 9.9.

*Отримано 27.08.2013*